

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Studijní program B2341 – strojírenství

Sledování plynotvornosti netrvalých forem

Monitoring of gassiness perennial forms

Jakub Jareš

KSP – SM – B33

Vedoucí bakalářské práce : Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant bakalářské práce : Ing. Jiří Machuta, PhD.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 45

Počet obrázků: 19

Počet tabulek: 3

Počet vzorců: 23

27.5. 2011

Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Obor strojírenská metalurgie

Studijní program: B2341 - strojírenství
Student: Jakub Jareš
Téma práce : Sledování plynotvornosti netrvalých forem
Monitoring of gassiness perennial forms

Číslo BP: KSP – SM – B33

Vedoucí BP: Prof. Ing. Iva Nová, Csc. – TU v Liberci

Konzultant: Ing. Jiří Machuta, PhD. – TU v Liberci

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou plynotvornosti netrvalých formovacích a jádrových směsí. Plynotvornost je nežádoucí vlastností formovacích směsí a je třeba ji patřičnými způsoby předcházet. Teoretická část popisuje jednotlivé složky netrvalých formovacích směsí, dále charakteristiku plynotvornosti a způsoby jejího měření. V experimentální části bylo provedeno zkušební měření na zařízení pro měření plynotvornosti umístěném na KSP TU v Liberci. Cílem této práce bylo vytvořit ucelený přehled o vzniku a měření plynotvornosti netrvalých pískových forem.

Abstract:

This thesis deals with an issue of interruptible molding and core mixtures gassiness. Gassiness is an undesirable property of molding compounds and therefore should be appropriately prevented. The theoretical part describes the various components of perennial core mixtures, then characteristics of gassiness and methods of measurement. In the experimental part, there has been done a test measuring on a device for gassiness measuring, that is located at the Technical University of Liberec. The aim of this study was to develop a comprehensive overview of the creation and the measurement of gassiness of perennial core molds.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně za použití příslušné literatury

V Liberci dne 27. května 2011

.....
Jakub Jareš

Proletářská 460

463 12 Liberec 23

Poděkování

Děkuji vedoucí mé bakalářské práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc za poskytnutí podkladů a cenných rad potřebných pro vypracování. Dále konzultantovi Ing. Jiřímu Machutovi, PhD. za odborné, metodické vedení práce a veškerý čas, který mi věnoval.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 27.05. 2011

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 27.05. 2011

Signature:



OBSAH

ÚVOD	7
1. NETRVALÉ FORMOVACÍ SMĚSI.....	8
1.1 OSTŘIVA FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ	8
1.1.1 KYSELÁ OSTŘIVA	9
1.1.2 NEUTRÁLNÍ OSTŘIVA	10
1.1.3 ZÁSADITÁ OSTŘIVA.....	12
1.2 POJIVA FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍCH	13
1.2.1 POJIVA I. GENERACE.....	15
1.2.2 POJIVA II. GENERACE	17
1.2.3 POJIVA III GENERACE	24
1.3 PŘÍSAKY VE FORMOVACÍCH SMĚSÍCH	25
1.4 VODA VE FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍCH	25
2. PLYNOTVORNOST FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ.....	26
2.1 URČOVÁNÍ PLYNOTVORNOSTI FOREM A JADER	31
2.2 VZNIK A PRONIKÁNÍ PLYNŮ A PAR DO TAVENINY	34
2.3 MĚŘENÍ PLYNŮ A PAR VZNIKAJÍCÍCH PŘI ODLÉVÁNÍ.....	35
2.4 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PLYNOTVORNOSTI NA KSP TUL	38
3. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ PLYNOTVORNOSTI.....	41
4. DISKUSE POZNATKŮ A VÝSLEDKŮ.....	43
5. ZÁVĚR.....	44
6. SEZNAM LITERATURY:.....	45



ÚVOD

Slévárenství je důležitým průmyslovým odvětvím, které prodělalo již několik tisíc let dlouhý vývoj. Jeho historie je datována již od 3000 let před naším letopočtem, kdy se začaly vyrábět první odlitky. Od této doby prošlo značným technologickým rozvojem, který umožnil výrobu složitějších odlitků z různých druhů slitin. Produkty slévárenské výroby jsou k vidění na každém kroku. Jsou to jak zařízení všech průmyslových závodů, tak předměty pro dennodenní použití, které vlastníme v domácnostech.

Základní princip odlévání spočívá v lití roztaveného materiálu do připravené formy, následným chladnutím odlitku a vyjmutím z formy. Budoucí odlitek tvoří negativ tvaru formy. Nejpoužívanější metodou odlévání je gravitační lití do netrvalých pískových forem. Použití další metody, a to lití do kovových forem, se vyplatí používat pouze u velkosériových provozů, jelikož jejich pořizovací náklady jsou příliš vysoké.

Slévárenství je velmi rozsáhlý výrobní obor, který svou problematikou zasahuje do mnoha vědních oborů. Složení formovacích směsí vyžaduje znalost hlavně organické a anorganické chemie. Dále při tuhnutí odlitků je nutno brát v úvahu zákony termodynamiky a zákony sdílení tepla.

Slévárenská výroba byla zpočátku založena pouze na získaných empirických zkušenostech, postrádajících znalosti o podstatě probíhajících dějů uvnitř formy. Postupem času a s uplatněním výpočetní techniky se vývoj urychlil a umožnil dosažení mnohem lepších výsledků. Přibyla řada nových technologií pro výrobu odlitků, jako je např. používání automaticky řízených vstřikovacích lisů. Výpočetní technika především dále umožnila sledování dějů uvnitř formy a jejich simulaci, což ušetří mnoho práce a také financí již při návrhu nových forem a odlitků.

Jedním z těchto dějů, jež je potřeba sledovat je také plynotvornost netrvalých forem, která se negativním účinkem podepisuje na výsledné kvalitě odlitků. S tímto problémem je spojena má rešeršní bakalářská práce, jejímž úkolem je podat informace o vzniku a měření této nežádoucí vlastnosti slévárenských směsí.



1. NETRVALÉ FORMOVACÍ SMĚSI

Netrvalé formovací směsi jsou vyrobeny smícháním jednotlivých složek. Jsou pouze jednorázové tj. slouží pouze pro jedno odlití. Jedná se o nejjednodušší a nejekonomičtější variantu forem pro odlévání. Vyznačují se špatnou tepelnou vodivostí.

Formovací směsi by měly být dobře formovatelné, prodyšné, chemicky stálé a pokud možno co nejméně plynotvorné.

Pro výrobu pískových forem se formovací směsi skládají ze tří základních komponent - ostřiva, pojiva, přísad a popř. vody (především u směsí první generace).

1.1 OSTŘIVA FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ

Ostřivem je hlavní “nosná” část formovacích nebo jádrových směsí. Jeho obsah dosahuje až 90% celkové hmotnosti a určuje většinu chemických a mineralogických vlastností. Ostřivem jsou v podstatě částice formovací směsi, které jsou větší než 0,02 mm. V některých speciálních případech slévárenských forem, jako jsou např. keramické formy apod., mohou mít částice ostřiva i menší rozměr. Většina ostřiv se nachází v přírodě jako produkty rozpadu hornin, v menší nebo větší míře ovlivněné činností vody, vzduchu nebo ledu, především křemenné ostřivo. Některé druhy lze připravit umělou cestou. Hlavním požadavkem kladeným na ostřivo je jeho schopnost odolávat vysokým teplotám [1].

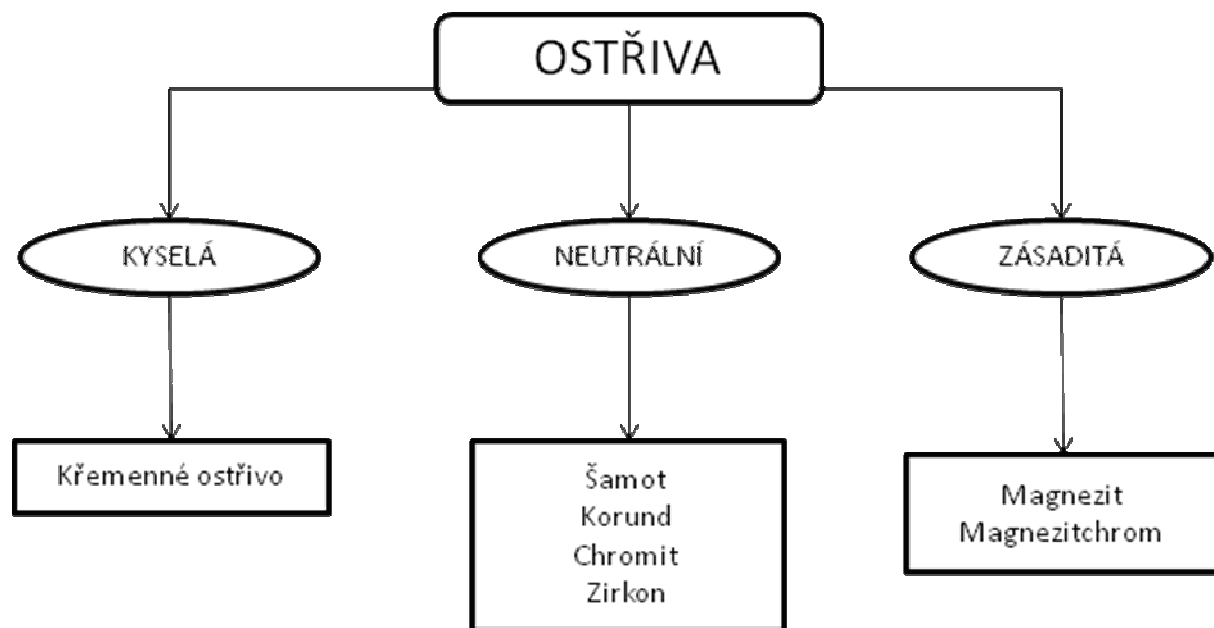
Podle chemické povahy se dělí ostřivo na:

- 1) Kyselé (křemenné)
- 2) Neutrální (šamot, chromit, korund, zirkon atd.)
- 3) Zásadité (magnezit, magnezitchrom)

Podle druhu původu se dělí ostřivo na:

- 1) přirozená (křemenné písky)
- 2) umělá (šamotový lupek, elektrokorund, kovové kuličky)

Na obr. 1 je schéma rozdělení ostřiv.



Obr. 1 Rozdělení ostřiv

1.1.1 KYSELÁ OSTŘIVA

Křemenné ostřivo - je známé pod pojmem *křemenné písky*. Jedná se o nejpoužívanější ostřivo, neboť se vyskytuje ve volné přírodě s vhodnou zrnitostí. Jeho základní surovinou je kyselý oxid křemičitý (SiO_2 – křemen). Teplota tání křemene je 1700°C . Na křemenné ostřivo jsou kladeny vysoké požadavky v oblasti mineralogické a chemické čistoty, tvaru zrn a granulometrické stavby. Optimálním tvarem křemenného ostřiva je koule, jelikož má při maximální objemu minimální plochu. Dalším důležitým prvkem je granulometrická stavba ostřiva. Výhodná velikost je od 0,1 do max. 0,5 až 0,6 mm s průměrnou zrnitostí 0,15 až 0,35mm. SiO_2 má i řadu nevhodných vlastností pro odlévání. Zahřátím prodělává polymorfni přeměny, které se projevují objemovými změnami a poruchami celistvosti formy. Křemen jako kyselá látka reaguje s látkami zásaditými, a to má za příčinu snížení žáruvzdornosti celé směsi. Další škodlivou vlastností je křemenný prach, který vyvolává silikózu (nemoc plic) [2].

1.1.2 NEUTRÁLNÍ OSTŘIVA

Šamot - jedná se o uměle vytvořené ostřivo. Šamotem se označuje vypálený žáruvzdorný jíl, který obsahuje nejméně 30% Al_2O_3 a zbytek směsi tvoří SiO_2 (křemen). Všechny další látky jsou znečišťujícími příměsemi, jejich množství a složení závisí na čistotě výchozí suroviny. Neprodělává žádné překrystalizační přeměny. Nejčastěji se používá na ocelové odlitky. Teplota tání je stejná jako u křemenného ostřiva 1700°C . Na obr. 2 jsou uvedeny částice ostřiva šamotu o různé zrnitosti.



A)



B)

A) – částice šamotu o velikosti 1 až 3mm; B) částice šamotu o velikosti cca 0,05 mm

Obr. 2 Částice ostřiva šamotu [12]

Olivín - je přírodní materiál sopečného původu s vysokým obsahem hořčíku (Mg). Jedná se o tuhý roztok dvou nejrozšířenějších křemičitanů:

Mg_2SiO_4 – Forsterit s teplotou tání 1900°C

Fe_2SiO_4 – Fayalit s teplotou tání 1205°C

S olivínem se vyskytují další doprovodné prvky, jako je serpentín, chromit, spinel, magnesit atd. Olivín, viz obr. 3, se nejčastěji nachází v Norsku, Japonsku a USA.



Obr. 3 Rozpraskané zrno zeleného olivínu v čediči. [13]

Korund – a jeho znečištěné formy se objevují také pod názvem smirek. V přírodě se nachází jako safír a korund. Na slévárenské účely se používá korund uměle vytvořený, který se označuje jako elektrokorund (Al_2O_3 – oxid hlinitý). Oxid hlinitý je polymorfní oxid, který se vyskytuje ve dvou modifikacích α a γ .

- *Alfa-korund*: krystalizuje v šesterečné soustavě a řadí se mezi vysokoteplotní modifikace Al_2O_3 , které vznikají z modifikace γ nad teplotou 1000°C . Jeho hustota je cca 4000 kg.m^{-3} a je nerozpustný v kyselinách.
- *Gama-korund*: krystalizuje v krychlové soustavě a při teplotě nad 1000°C překrystalizuje na modifikace alfa. Jeho hustota je 3647 kg.m^{-3} .

Nejpoužívanější je směs alfa a beta korundu, která vychází finančně nejlépe. Při teplotách nad 1000°C se smršťuje.

1.1.3 ZÁSADITÁ OSTŘIVA

Zirkon - zirkonová ostřiva jsou tvořena směsí silikátů $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ a ZrO_2 . Hustota je přibližně 4600 kg.m^{-3} . Teplota tání je 2500°C . V porovnání s křemenným ostřivem mají nižší lineární roztažnost, dvojnásobnou tepelnou vodivost a vysokou stabilitu vůči oxidům železa. Jsou odolné proti penetraci a zapékání povrchů odlitků. Nelze je použít pro odlévání manganových ocelí, protože vykazují kyselou reakci díky obsahu SiO_2 . Pevně vázaný SiO_2 nezpůsobuje na rozdíl od křemenného ostřiva vznik silikózy. Na zirkon lze použít všechny druhy pojiva. Zirkonová ostřiva jsou velice nákladná, proto se používají jen pro speciální formovací směsi. Velké uplatnění nacházejí v různých typech slévarenských nátěrů a námazků. Nejčastěji se zirkon vyskytuje na území Ukrajiny, Srí Lanky, Brazílie a Austrálie [3].

Magnezit - MgO , uměle vytvořené ostřivo vytvořené z minerálů pálením a slinováním $\text{MgCO} = \text{MgO} + \text{CO}_2$. Slinuje se při teplotách 1400°C a odolává teplotám cca 2000°C . Obsahuje 85% MgO . Používá se pro odlévání legovaných ocelí.

Magnezitchrom - obsahuje 60% MgO do 20% Cr_2O_3 . Pro tato ostřiva jsou charakteristickými vlastnostmi vysoká tepelná vodivost, vyšší hustota a nízký součinitel lineární roztažnosti, který dává předpoklady k odolnosti vůči náhlým změnám teplot.

V tabulce 1.1 je uveden přehled základních druhů ostřiv, jejich chemická podstata a příslušné teploty tání.

Tab. 1 Přehled základních druhů ostřiv a jejich teplot tavení [1]

Druh ostřiva	Základní složka	Teplota tavení
Křemen	SiO_2	1710°C
Forsferit	Mg_2SiO_4	1910°C
Korund	Al_2O_3	2050°C
Zirkon	$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	2430°C
Šamot	Al_2O_3	$1670 \text{ až } 1730^\circ\text{C}$
Magnezit	MgO	2800°C

1.2 POJIVA FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍCH

Částice ostřiva prakticky nevytvářejí mechanicky stabilní soustavu, neboť přitažlivé síly mezi nimi se začínají projevovat až u částic o rozměru menším než 0,001mm. Proto musí být ke spojení zrn ostřiva ve formovací směsi použito tzv. pojiv, látek, které jsou schopny vytvořit na částicích ostřiva souvislou vrstvu, jejímž prostřednictvím se částice dotýkají a vytvářejí se mezi nimi vazby. Pojiva se dělí podle chemické podstaty, resp. původu na:

- 1) Anorganická pojiva
- 2) Organická pojiva

1) Anorganická pojiva

Jsou minerálního původu, udělují formovací směsi vaznost již v surovém stavu, nebo jí vytvrzují po chemickém nebo fyzikálním zpevnění. Patří mezi ně především jíly, cementy, sádra, vodní sklo, organické estery kyseliny křemičité aj. Tato pojiva jsou vhodná pro lití za syrova (bez vysušení). Díky své chemické podstatě vyvíjí málo plynů při lití (výjimku tvoří sádrové formy, které je před použitím nutno sušit a žíhat). Např. formy spojené vodním sklem mají po odlití zhoršenou rozpadavost. Celkově lze konstatovat, že anorganická pojiva vykazují nižší plynotvornost, než pojiva organická.

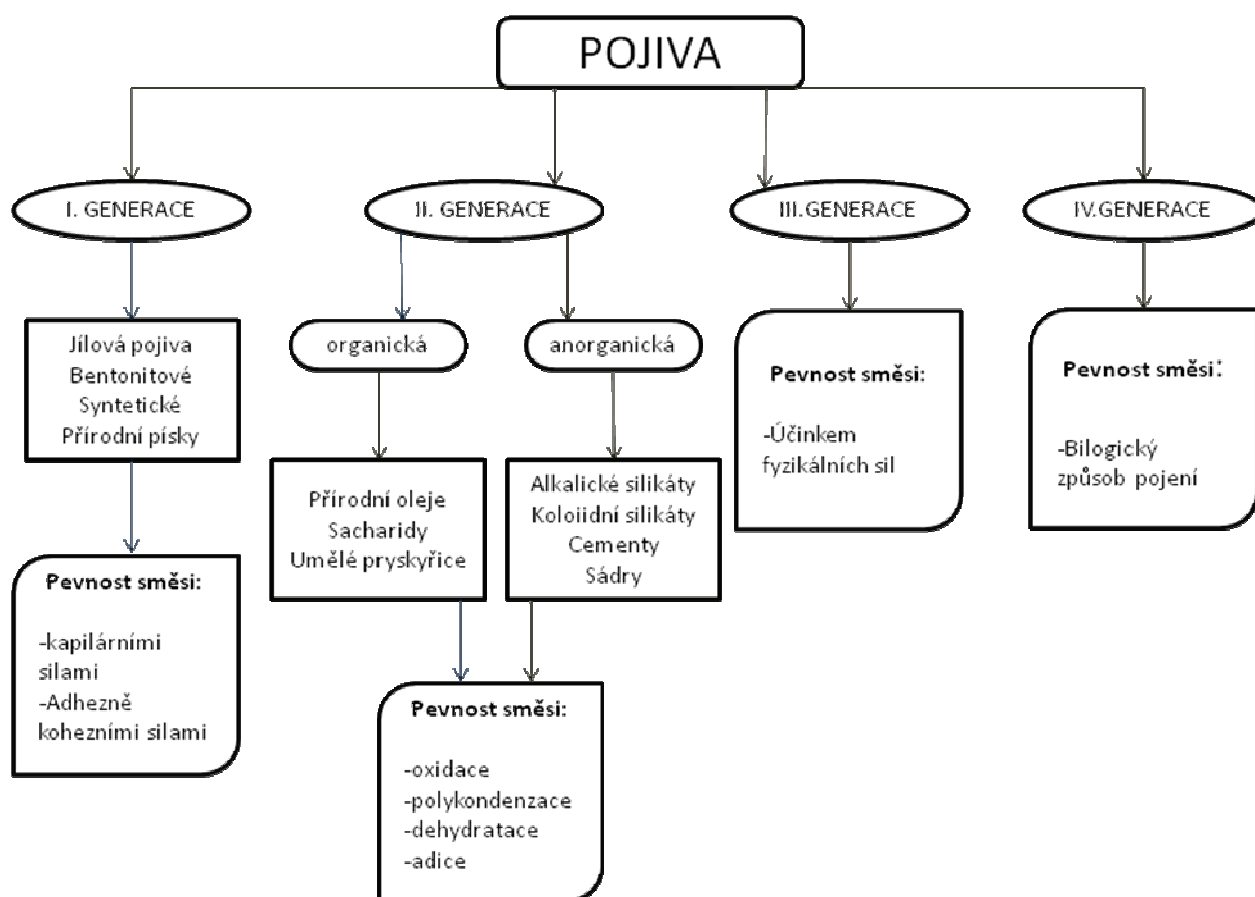
2) Organická pojiva

Tvoří velkou oblast formovacích a jádrových směsí. Patří sem především umělé pryskyřice, oleje a sacharidy. Charakteristickými vlastnostmi těchto směsí jsou vysoká tekutost za syrova a možnost řízeného tepelného, nebo chemického ztužení. Jejich nevýhodou je značný vývin plynů při lití. Naopak vykazují dobrou tepelnou destrukci, vyhořívání při lití a dobrou rozpadavost. Značná zdravotní závadnost všech organických pojiv vyžaduje dodržování přísných bezpečnostních opatření.

V současné době je vývoji slévarenských pojiv věnována značná pozornost také z hlediska dopadu na životní prostředí. Pojiva formovacích a jádrových směsí se dělí podle způsobu pojení na:

- 1) Pojiva I. generace (mechanický způsob pojení)
- 2) Pojiva II. generace (chemický způsob pojení)
- 3) Pojiva III. generace (pevnost se získává v důsledku fyzikálních sil)

Předpokládá se, že čtvrtá generace pojiv bude splňovat ekologické a hygienické podmínky. Tato pojiva by měla být na bázi proteinů nebo živých organismů, nesmí být toxická a nesmí zatěžovat lidský organismus ani životní prostředí [2].



Obr.4 Rozdělení pojiv

1.2.1 POJIVA I. GENERACE

Jedná se o jílová pojiva, která se svým významem řadí na první místo v použití. Patří k nejrozšířenějším slévarenským pojivům, protože jsou ekonomicky dostupné. Jedná se o směsi jemně rozpadlých jílových nerostů. Vlivem vysokých vazných sil dodávají formovacím směsím dobrou pevnost za syrova i za sucha. Podle struktury se rozlišují jíly kaolinitické, illitické a montmorillonitické. Důležitou součástí formovacích směsí s jílovými pojivy je volná (molekulová) voda, která umožňuje rozvinout plastické vlastnosti jílu při vytváření vaznosti směsi.

Pojení je výsledkem sil kapilárního tlaku a velmi malých Van der Waalsových sil. Mezi částicemi ostriva a pojiva působí síly adhezní (přilnavé) a mezi částicemi pojiva pak síly kohezní.

Kaolinitický jíl - kaolinit – ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), viz.obr. 5 – je hlavní součástí žárovzdorných jílu. Má vysokou žárovzdornost, ale dosahuje poměrně malé vaznosti. Do směsí se jich přidává až 20%. Používají se pro formy na těžké ocelové odlitky a jsou základem šamotových formovacích směsí. Při teplotách 500 až 600 °C dochází k jejich dehydroxylaci, tedy k odstranění chemicky vázané vody. Proto se musí šamotové formovací směsi vypalovat [2].



Obr. 5 Šedobílý kaolín složený převážně z kaolinitu [14]

Illitické jíly- jsou slídové jíly, které se nacházejí ve většině přirozených formovacích písků. Nejdůležitější z illitických jílu je glaukonit, který je tvořen drobnými krystalky zelené barvy. Podle barvy i složení je to železnato-železitý jíl s 20 až 25% oxidů železa. Po dokonalém rozetření je velmi plastický a formovací směsi s ním dosahují vysokých vazností. Spékavost těchto pojiv je okolo 1300°C. Na lici formy vytváří tenkou spečenou vrstvičku formovacího materiálu, která se nerozplavuje a snadno se odlupuje z odlitků. Dodávají směsím dobrou pevnost za syrova a velkou pevnost po vysušení.

Montmorillonitické jíly- $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n \text{H}_2\text{O}$ – Montmorillonit (hlavní minerál horniny zvané Bentonit, viz obr. 6) vznikl zvětráním sopečných hornin, jako čediče, diabasu a hlavně jejich popela. Proces bentonizace probíhal především v zásaditém prostředí na rozdíl od kaolínu, jehož metamorfóza předpokládá kyselé prostředí. Od kaolínu se bentonit liší i svým vzhledem, je různobarevný (žlutý, šedý, červený), na omak mastný. Pro svou dobrou plastičnost, absorpční schopnosti a tixotropní vlastnosti je využíván v chemickém průmyslu, při těžbě ropy, v zemědělství a především ve slévárenství.

Vysoká vaznost bentonitových jílu ve formovacích směsích umožňuje snížit jejich obsah až 3x oproti jílu jiných druhů. Malý obsah jílu znamená také nízký obsah vody ve formovací směsi, což umožňuje odlévání forem na syrovo.



Obr. 6 Zemité červenohnědý montmorillonit [15]

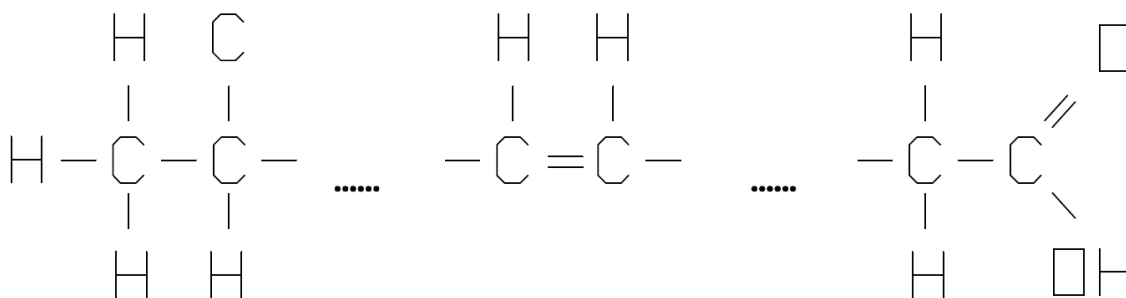
1.2.2 POJIVA II. GENERACE

Postata pojení je založena na chemické reakci, která může probíhat jak za tepla, tak za studena. Pojiva druhé generace se dělí na organická a anorganická (minerálního původu).

ORGANICKÁ POJIVA II. GENERACE:

Směsi používající organická pojiva druhé generace se vyznačují vysokou pevností po vytvrzení v ohybu, nízkou teplotou termodestrukce a dobrou rozpadovostí. To je předurčuje k uplatnění především v oblasti výroby jádrových směsí, využívajících moderní metody tvorby jader.

Olejová pojiva patří mezi nenavlhavá a ve vodě nerozpustná. V praxi se používají pouze ty, které mají schopnost tuhnout na základě oxidace za vzniku pryskyřičných látek. Nejčastěji se používají pro výrobu jader, směsi obsahují 2 - 4% olejového pojiva (fermeže). Jejich hlavní surovinou jsou estery rozličných mastných nenasycených kyselin, jejichž základem je benzenové jádro s několika dvojnými vazbami (např. kyselina olejová) [4].



Obr. 7 Strukturní vzorec kyseliny olejové [3]

Čím více dvojných vazeb kyselina obsahuje, tím lépe tuhnou tuky oxidací a jsou vhodnější pro slévarenské pískové směsi. Kapalná olejová pojiva se nastavují dalšími příměsemi jako je sulfitový louh, dextrin nebo umělé pryskyřice.

Oxidace a sušení olejových pojiv při teplotě 130 až 250°C způsobuje spuštění vytvrzovacího procesu ostřiva s pojivem [3].

Sacharidy na rozdíl od olejových pojiv jsou ve vodě rozpustné, proto může být při pojení směs vlhká. Sacharidy výrazně zvyšují vaznost písku za syrového stavu. Jejich hlavní nevýhodou je přejímání vlhkosti ze vzduchu. Po vysušení vykazují dobré pevnostní vlastnosti, a proto se používají při výrobě jader [2].

Pryskyřice jsou v dnešní době hojně využívány hlavně díky svým dobrým slévárenským vlastnostem. Po vytvrzení jsou ve vodě nerozpustné a odolávají navlhání ze vzduchu. Při vytvrzování dochází k obalení zrna ostřiva a vytvoření kompaktní, tepelně nevratné hmotě. Jako pojiva se nejvíce používají pryskyřice: fenolformaldehydové, močovinoformaldehydové, furanové a kombinované.

Vytvrzováním syntetických pryskyřic dochází k polykondenzaci. Při polykondenzaci vznikají nejprve makromolekuly jako meziprodukty. Během reakce neustále vzrůstá molekulová hmotnost jednotlivých molekul na úkor molekul menších rozměrů.

Vaznost směsi za syrova je ovlivněna viskozitou pryskyřičných pojiv. Nejviskóznější jsou směsi fenolformaldehydové, dále močovinoformaldehydové a nakonec furanové. Je-li vaznost pojiva příliš malá, je nutné upravit pryskyřici dalšími přísadami např. sacharidy nebo malým množstvím bentonitu.

Vytvrzování pryskyřičných pojiv všemi způsoby probíhá mnohem vyšší rychlostí než u dříve používaných pojiv. Pevnost v ohybu po vytvrzení směsi za studena závisí na mnoha činitelích, z nichž mezi hlavní řadíme: typ použitého ostřiva, pryskyřice, katalyzátoru a způsobu přípravy.

Z chemického hlediska jsou pryskyřice zásaditého charakteru a vývoj jejich uplatnění ve slévárenství je založen na posunu jejich zásaditosti s přidáním kyselého média do oblasti vyšší kyselosti.

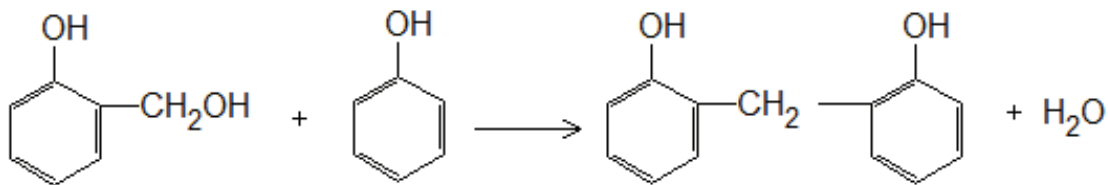
Všechna pojiva na základu umělých pryskyřic mají toxické účinky na lidský organismus. Jedná se o vývin volného fenolu, formaldehydu nebo furanu během přípravy a vytvrzování směsi, který fyziologicky působí na centrální nervovou soustavu člověka. V některých případech se uvolňuje při odlévání karcinogenní uhlovodík benzypen 3,4. Proto je další vývoj pryskyřic ovlivněn přísnými bezpečnostními předpisy na pracovní a životní prostředí.

V současné době se na trhu objevuje velká řada pryskyřic pod různými obchodními názvy. Pojiva, která se používají v posledních letech, jsou zdravotně méně závadná a některé

mají i příznivější pojící účinky. Podle způsobu vytvrzování se pryskyřice dělí na:

- a) tvrditelné teplem
- b) Tuhnoucí za studena
- c) Vytvrditelné vzdušnou emulzí triethylaminu.

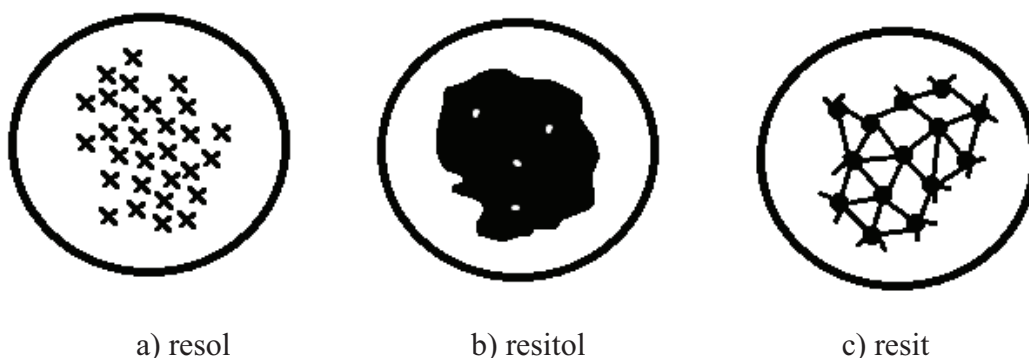
A) *Teplem tvrditelné pryskyřice* - při ohřevu fenol-formaldehydové pryskyřice vznikají reakce, které zvětšují její molekulovou hmotnost. Při teplotách nižších než je 170°C reaguje methylová skupina s reaktivním vodíkem jiného fenolického jádra, tvoří se methylenový můstek a dochází k odštěpování vody.



Obr. 8 Strukturní vzorec reakce fenol-formaldehydové pryskyřice [3]

Druhá etapa tepelných reakcí začíná po překročení teploty nad 160 °C a dosahuje maxima při teplotě 200°C. Při této etapě dochází k částečné ztrátě formaldehydu a voda se přestává odštěpovat.

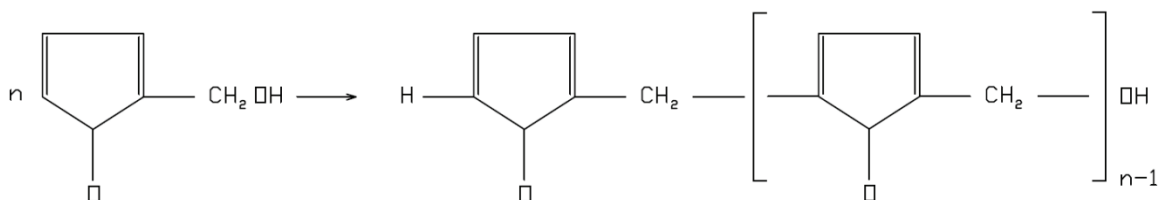
Celý proces se dá rozdělit na tři stavy, v nichž se pryskyřice během konverze nachází. Nejprve je to tavitelný rozpustný produkt (resol) obr. 9, poté se z něho stává rozpustný netavitelný (resitol) a nakonec nerozpustný a netavitelný (resit). Zpočátku se vytvoří centra izokoloidního charakteru, jejichž tvar, velikost a počet závisí na reakční teplotě a na množství katalyzátoru. S pokračující reakcí se vytváří kolem center stále větší aglomeráty, až se přiblíží sférokoloidní struktuře (resitolu). Celý pochod je připravován na krystalizaci. Dalším zvýšením teploty pokračují reakce, při kterých se aglomeráty pospojují navzájem a vytvoří tak trojrozměrnou strukturu resitu, která odpovídá konečnému stavu vytvrzené pryskyřice.



Obr. 9 Stadia vytvrzování fenol- formaldehydové pryskyřice [3]

Směsi na bázi fenol-formaldehydových pryskyřic obsahují cca 100 hmotnostních dílů ostřiva a 3,5 až 4,5 hmotnostních dílů FC Resolu 5260. Doba míšení 2 až 3 minuty, životnost při 20°C je cca 12 hodin. Optimální teplota v horkém jaderníku 190 – 200 °C. Doba vytvrzování 2 až 5 minut. Pevnost směsí po vytvrzení v ohybu činí 5,5 až 6,5 MPa.

B) *Pryskyřice vytvrzované za studena* - schopnosti samovolného vytvrzování derivátů furanových pryskyřic v kyselém prostředí bylo poprvé využito na konci šedesátých let. Této skutečnosti bylo využito také při přípravě formovacích směsí, které jsou-li pojeny furanovými pryskyřicemi, velice rychle tvrdnou i za studena. Podmínkou je použití kyselých katalyzátorů. Technologie furanových směsí úplně vyloučila sušení jader a výrazně zkrátila výrobní i vytvrzovací časy. Jádra dosahují výborných pevnostních vlastností, a proto se mohou vyrábět bez výztuh. K tuhnutí směsí dochází přímo v jaderníku a díky tomu se dosáhne vysoké přesnosti rozměrů. Po odlití mají jádra dobrou rozpadovou schopnost.



Obr. 10 Strukturní vzorec tvorby lineárních molekul v kyselém prostředí [3]

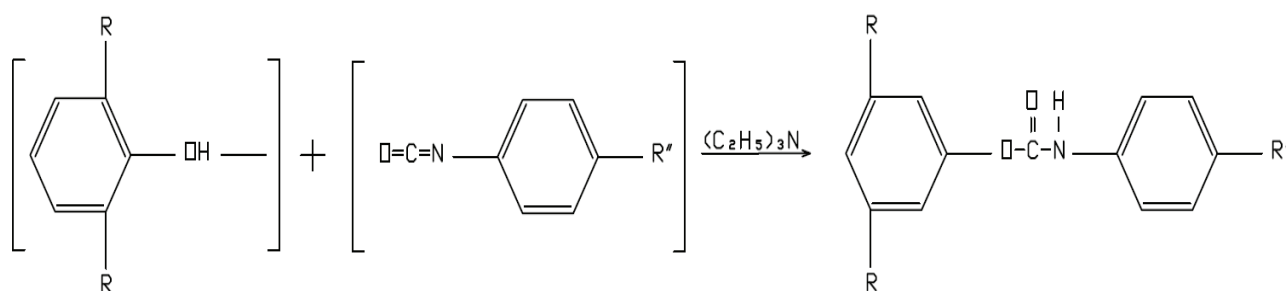
Základní složkou furanových pryskyřic je fufrurylalkohol. Reakce vzniku pryskyřic z furfurylu je založena na mezimolekulární kondenzaci, při níž se odštěpuje asi 18% vody. Pryskyřice je tvořena řetězovými molekulami, tvořenými z furanových jader spojených methylenovými můstky.

Rychlost konverze pryskyřice do netavitelného a nerozpustného stavu závisí na teplotě, aktivitě a koncentraci kyselých katalyzátorů. Proces samokondenzace lze v kterémkoliv okamžiku zastavit nebo zpomalit ochlazením nebo přidáním zásaditých látek.

Proces formování musí být zajištěn kvalitním odsáváním, případně hermetizací formovací linky.

C) *Vytvrditelné vzdušnou emulzí triethylaminu* - princip polykondenzace je založen na použití dvousložkového systému, který vlivem katalyzátoru tuhne za studena při teplotě okolního prostředí. První složku tvoří fenolová pryskyřice v roztoku a druhou složkou je roztok polyisokyanátu. Vlivem působení triethylaminu dochází ke spojování OH- skupiny fenolové pryskyřice s NCO- skupinami polyisokyanátu a vzniká uretanová pryskyřice viz obr 11.

V praxi děj probíhá nejprve promísáním ostríva se dvěma kapalnými složkami, následuje vstřelení směsi do jaderníku a vytvrzení profuknutím směsi plynnou emulzí triethylaminu.



Obr. 11 Rovnice chemické reakce polykondenzace [3]

Formovací směsi využívající pro pojení uretanové pryskyřice patří mezi systémy s ovládaným ztužováním pojiva. Pro přípravu triethylaminu jsou konstruovány speciální generátory, v nichž se připravuje vzdušná emulze, jíž se profukují jádra z fenolisokyanátové směsi tlakem 0,2 MPa.

V současné době se jedná o jednu z nejrychlejších metod přípravy jader. Jádra se vyrábí hned vedle formovacích linek a rovnou se vkládají do formy. Díky tomu se pracovní takt na jednu formu značně zrychlil. Bezpečnostní opatření jsou ještě přísnější než při výrobě pomocí furanových směsí [3].

ANORGANICKÁ POJIVA II. GENERACE

Sádry se používají pro výrobu sádrových forem, které jsou určeny k výrobě přesných odlitků. Sádra plní funkci ostřiva i pojiva, jen ve výjimečných případech se přidává jemné ostřivo. Prášková sádra představuje polohydrát síranu vápenatého. Ten se po smísení s vodou změní na sádrovou břečku, která po určité době ztuhne v kompaktní celek. Z chemického hlediska představuje ztuhlá sádra dihydrát síranu vápenatého.

Cement jako pojivo se používá především v zahraničí (Francie, SRN), cementové formovací směsi obsahují 70 až 80 hmotnostních dílů křemenného písku 10 až 12 dílů cementu a zbytek tvoří voda. Dnes se jako pojivo používá zřídka. Cement dává již v množství 10 až 15% dobrou pevnost po ztuhnutí. Nevýhodou je poměrně dlouhá doba tuhnutí (i několik dnů), špatná rozpadavost po odlití a potíže s vratným pískem.

Vodní sklo z chemického hlediska představuje směs křemičitanů sodných o různé hmotnosti molekul. Nejdříve se směsi používající vodního skla jako pojiva nazývaly „chemicky tvrzené“ CT směsi a přinesly do slévárenství velké změny. Používají se pro výrobu forem. Pro výrobu jader jsou nevhodné, díky zvýšené pevnosti po vysušení. Vodní sklo jako pojivo vytvrzované CO_2 má řadu nevýhod, které vedly k masivnímu vývoji nových technologií vytvrzování (přidání sacharózy, vytvrzování pomocí teplého nebo studeného vzduchu, pomocí mikrovln atd.). Mezi hlavní nevýhody patří:

- Malá vaznost (pevnost za syrova)
- Nižší pevnost po vytvrzení ve srovnání s organickými pojivy
- Vysoká spotřeba CO_2
- Zhoršená rozpadavost

Formovací směsi s vodním sklem se dělí do dvou skupin:

- a) Směsi s ovládaným ztužováním (profukováním CO_2 , vytvrzování vzduchem, vytvrzování mikrovlnné a infračerveným zářením)
- b) Směsi bez ovladatelného ztužování (ST směsi a samotvrdnoucí směsi)

Pojivový systém vodní sklo – CO₂; výroba CT směsí

Princip metody spočívá v profouknutí upěchované formy z křemičitého skla s vodním sklem oxidem uhličitým. Tato technologie se používá jak pro výrobu jader, tak forem. Jeho výhody jsou dostupnost směsí, jednoduchá příprava, dobrá tekutost, spěchovatelnost, rychlé vytvrzování, dostatečná životnost, nízká plynotvornost a odolnost proti vzniku zálupek. Proces se dá zapsat chemickou reakcí:



Oxid uhličitý je suchý, kyselý plyn, který vodní sklo vysuší a současně převede do kyselé rosolovité podoby, tím vzniká gel kyseliny křemičité ($m\text{Si}(\text{OH})_4$). Gel kyseliny křemičité postupně přechází v tuhou hmotu, která získává pevnost v tlaku cca 1MPa. Dalším produktem reakce je soda (Na_2CO_3). Ta se může při vyšších teplotách rozkládat na plyn Na_2O , který je pro proces odlévání škodlivý (možné naplynění taveniny).

Možnosti použití vodního skla se odvíjí od jeho horší rozpadavosti, která ho předurčuje spíše jako pojivo pro formy. Proto se v poslední době vynakládá značné úsilí k zlepšení těchto vlastností pomocí různých přísad, které podporují rozpadavost. Díky nim se může technologie používat také pro jádrové směsi, kde je rozpadavost žádoucí vlastností.

Pojivový systém samotvrdnoucích směsí s vodním sklem (ST- směsí)

Jedná se o směsi s vodním sklem, kdy je proces vytvrzování založen na jiném principu a je doprovázen buď exotermickou reakcí, nebo bez exotermické reakce.

Mezi tyto metody se řadí ST směsi vytvrzované práškovými čistými kovy (Al, Zn, atd.) nebo práškovým FeSi nebo CaSi, což je N-metoda (Nyshiana- proces). Obě skupiny ST směsí využívají principu rozkladu vody kovem (reakce alkalických roztoků s kovy) za vzniku vodíku a velkého tepelného efektu, který podporuje dehydrataci alkalického křemičitanu.

N- proces je založen na velké slučivosti kyslíku s křemíkem:



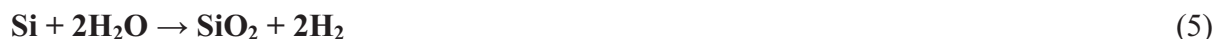
Průběh exotermické reakce se dá řídit variací obsahů vodního skla a FeSi ve směsi:



FeSi reaguje s NaOH:



Celý proces lze zapsat jednoduše:



Hlavní nevýhodou N- procesu je vznik vodíku, který reaguje se vzduchem a vzniká tím třaskavá směs. Vysoká teplota směsi při vytvrzovacím procesu má nepříznivé účinky na laky modelů a jaderníků.

Špatná rozpadavost forem s vodním sklem vedla k vývoji dalších technologií vytvrzování vodního skla. Jedním z nich je vytvrzování esterolem. Esterol obsahuje dvě složky esterů, první složka má nízkou rychlost vytvrzování a druhá vysokou. Esterol je hnědá až žlutá nehořlavá netoxická kapalina, bez zápachu a agresivních účinků.

Vytvrzovací proces je založen na dvoustupňové reakci. V prvním stupni dochází v alkoholickém prostředí vodního skla k rozkladu esteru, kdy se uvolňuje kyselina. V druhém stupni dochází vlivem uvolněné kyseliny z prvního stupně k želatinaci vodního skla a ke vzniku pojivových gelů kyseliny křemičité. Mechanismus je podobný jako při reakci vodního skla a CO_2 . Vodní sklo se sterolem vykazuje velmi dobrou rozpadavost.

Samovolně vytvrzované směsi s vodním sklem se hodí k výrobě jednoduchých až středně složitých jader bez zúžených průřezů, tenkých výstupků apod. s dostatečně velkými známkami zajišťujícími odvětrání a na formy zhotovované podle modelů takového tvaru, který umožňuje vyjímání modelu ze ztvrdlé formy. Proti metodě CO_2 je použití této směsi omezeno a vyžaduje kontinuální přípravu a dopravu do jaderníků nebo formovacích rámců [3].

1.2.3 POJIVA III GENERACE

Nejedná se o pojiva v pravém slova smyslu, ale spíše o pojivové systémy, neboť využíváme fyzikálních účinků pojení s ostřivem. Fyzikální účinek je vyvolávám pomocí zmrazení, magnetického pole nebo vakua. Při magnetickém způsobu pojení je nutno využívat speciálního ostřiva, které je složeno z malých magnetických broků. Pro ostatní způsoby se používají klasická ostřiva jako např. křemenné [4].

1.3 PŘÍSADY VE FORMOVACÍCH SMĚSÍCH

Do formovacích materiálů se někdy přidávají další přísady, kterými se mají zlepšit určité vlastnosti. V podstatě jde o látky uhlíkaté, neplastické a plastifikátory. Uhlíkaté látky (nejčastěji mleté černé uhlí – letek) se přidávají do bentonitových formovacích směsí na syrové formy pro litinové odlitky. K vysvětlení mechanismu jejich působení ve směsi existuje několik teorií. Zjednodušeně lze říci, že při odlévání dochází k jejich pyrolýze a vzniklé pyrolyzní produkty brání kovu proniknout mezi zrna písku a tím zlepšují povrch odlitku. Neplastické látky (křemenná moučka, šamotová moučka) jsou velmi jemné a vyplňují mezery mezi zrny formovacích písků. Tím se sice zlepšuje povrch odlitku, ale klesá prodyšnost formy. Plastifikátory (dextrin, glukóza, sulfitový louh) zlepšují plastické vlastnosti směsí a také jejich prodyšnost. Sacharidy zároveň zmenšují osychání formovacích směsí. Kromě toho existuje i určitá skupina přísad pro zlepšení rozpadavosti směsí s anorganickými pojivy.

1.4 VODA VE FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍCH

Funguje ve formovacích a jádrových směsích jako plastifikátor (dává formovací směsi vlastnosti potřebné k udržení tvaru po formování). Voda tvoří ve formě 3 - 4% celkové hmotnosti formovací směsi. Nejvíce se voda používá u směsí využívajících pojiva I. Generace (jílová pojiva), též při výrobě sádrových a cementových forem.

Voda je jedním z nejvíce plynotvorných prvků ve formovacích směsích. Zahříváním formy taveninou dochází k jejímu vypařování a tím vzniku plynů a par [9].

2. PLYNOTVORNOST FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ

Plynotvornost je nepříznivá vlastnost formovacích a jádrových směsí. Čím nižší bude hodnota plynotvornosti, tím bude lepší jakost povrchu odlitku. Dochází k němu při styku taveniny o vysokých teplotách s povrchem formovací směsi. Plynotvornost se vyjadřuje v cm^3 na 1 gram směsi nebo na cm^3 směsi. Množství plynů uvolňujících se z pískové formy záleží na druhu použitého pojiva a jeho podílu ve směsi. Dále na zrnitosti ostríva, na jeho náklonnosti k navlhání a obsahu dalších přísad sloužících ke zlepšení vlastností formy nebo vyvolávající vytvrzovací reakce.

Kromě množství uvolněných plynů je důležitá kinetika jejich vývoje a čas, při kterém dochází k uvolnění plynů. Ze složek používaných na výrobu formovacích směsí vykazuje největší plynotvornost voda a další kapalná rozpouštědla, některé minerály, organické přísady a další látky.

Plyny vznikající při odlévání tvoří směs, ve které převládají redukční složky (CO , H_2). Únik těchto plynů do atmosféry je doprovázen tlakem, který je závislý na jejich množství, rychlosti vývinu a odporu kladeného formovací směsí. Při vysokých hodnotách tlaku v blízkosti líce formy může dojít až k proniknutí těchto plynů do taveniny a tím po ztuhnutí vytvoření dutin uvnitř odlitku.

Při styku povrchu (líce) formy s taveninou dochází ke sdílení tepla a prohřívání formy. Rychlost prohřívání (zvětšování hloubky prohřátí) na určitou teplotu T , závisí na teplotních podmínkách na rozhraní tavenina - forma a na tepelně fyzikálních vlastnostech formovacího materiálu. Za zjednodušených podmínek lze změnu hloubky H_F prohřátí na teplotu t s časem vyjádřit vztahem:

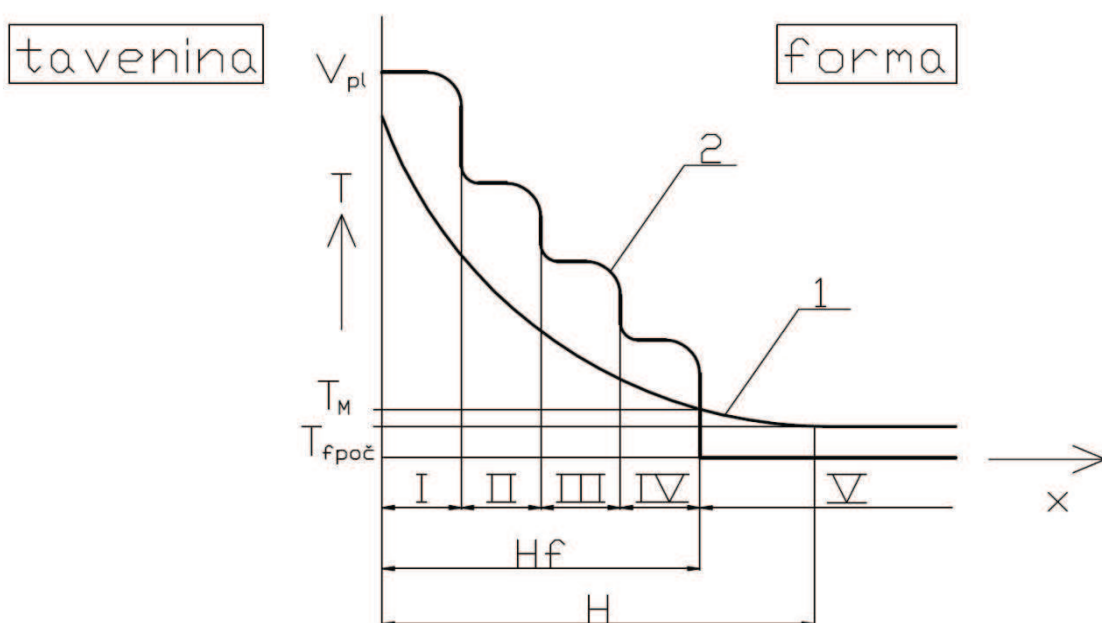
$$H_F = m_F \cdot \sqrt{t}, \quad (6)$$

kde značí: H_F – změnu hloubky prohřátí líce formy [m];

m_F – koeficient prohřátí formy [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$];

t – dobu ohřevu formy [s].

Po odlití se ve formě vytváří několik vrstev s různým stupněm vývinu plynů. Tloušťka každé vrstvy záleží na teplotě formy v daném okamžiku a hodnotami teplot rozkladu jednotlivých směsí. Jako první se rozkládají komponenty s nejnižší teplotou rozkladu. Za touto vrstvou se nacházejí vrstvy, kde dochází nejprve k oddělení chemicky vázané vody z bentonitu (u syrových forem) a minerálních příměsí, poté k vypaření mechanicky přimísené vody. V další vrstvě dochází ke kondenzaci plynů a par a poslední vrstvou je vrstva, kde nedochází k žádným změnám vlivem teploty. Hranice mezi jednotlivými zónami nejsou ostře ohraničené, ale přechází volně jedna do druhé. Důsledkem vzniku těchto vrstev ztrácí formovací směs své počáteční slévárenské vlastnosti a stejnorodost (chemicky nestejnorodé vlastnosti). Rychlost prostupu zplyňovaných látek hlouběji do formy závisí na kritické teplotě rozkladu, tepelné vodivosti směsi a na teplotě rozhraní tavenina - forma. Se snižující se hodnotou teploty rozkladu jednotlivých látek se snižuje rychlost posunu vrstev [1], [7].



- 1) průběh teplot ve formě v čase t od odlití; 2) objemy plynů V_{pl} uvolňující se ve vrstvách I až IV

Obr. 12 Průběh uvolňování plynů ve stěně slévárenské formy [1]

Tab. 2 Přehled teplot rozkladu vybraných látek [7]

Plynotvorná složka	Kritické teploty rozkladu [°C]
Voda	100
jílové pojivo	200 až 400
Vápenec	860 až 910
sulfitové pojivo	220 až 260
močovinoformaldehydové pryskyřice	280 až 320
fenolformaldehydové pryskyřice	650 až 750

Souhrn fyzikálně-chemických dějů, které se podílejí na tvorbě plynů a par při odlévání formovacích a jádrových směsí:

- 1) Vypařování vody a jiných rozpouštědel
- 2) Spalování (hoření, oxidace) organických látek
- 3) Tepelný rozklad organických látek (destilace)
- 4) Tepelný rozklad minerálů
- 5) Disociace plynů
- 6) Rozpínání vzduchu

VYPAŘOVÁNÍ VODY A JINÝCH ROZPOUŠTĚDEL

Vyskytuje se nejvíc u směsí, které obsahují vodu jako rozpouštědlo pojiv (např. jílu ve směsích pro syrové formy). Společně s vodou mohou směsi obsahovat i jiná rozpouštědla. Voda může být ve směsi s minerálními i organickými složkami vázána chemicky, fyzikálně chemicky nebo mechanicky.

Voda obsažená ve formovacích směsích je s minerálními i organickými složkami směsi vázána chemicky (je součástí krystalové mřížky). Lze jí uvolnit při poměrně vysokých teplotách, charakteristických pro daný minerál.

Fyzikálně chemicky vázaná voda na minerál tvoří disperzní prostředí koloidních soustav (např. jílu). K jejímu uvolnění je zapotřebí dovést značné teplo, množství vyloučené vody je přímo úměrné s teplotou, jaké je směs vystavena.

Mechanicky vázaná voda je ve směsích držena v důsledku sočivosti v kapilárách mezi jednotlivými částicemi směsi. Vazby jsou dány kapilárními silami a silami smáčení, záleží na povrchovém pnutí kapaliny a kapilárním tlaku a rovněž jsou určeny charakterem a stavem dotýkajících se materiálů. Její odpařování se odlišuje od vypařování vody volné, která se ve směsích také vyskytuje.

SPALOVÁNÍ (HOŘENÍ, OXIDACE) ORGANICKÝCH LÁTEK

Probíhá uvnitř směsí za přítomnosti oxidovadel, kterými jsou kyslík ze vzduchu, uzavřený v pórech formy, vodní pára a CO₂. Další možností výskytu oxidovadel uvnitř formy je příchod kapilárami formy. Vzdušný O₂ může v pásmu hoření prostupovat prostřednictvím difuze přes póry směsi a kromě toho je také kyslík obsažen na počátku procesu uvnitř pórů. Ve skutečnosti je množství kyslíku uvnitř formy velice malé a neumožňuje intenzivní průběh oxidace. Průchodnost formy kyslíkem po naplnění taveninou se prakticky zastavuje, protože plyny stoupající skrz formu z taveniny do atmosféry všechen vytlačí.

Z hlediska oxidace jsou významné zejména reakce oxidace tuhého uhlíku:



Ve slévárenství mají větší význam reakce okysličování tuhého uhlíku vodními parami a CO₂. Oxidační reakce uhlíku oxidem uhličitým probíhá za vysokých teplot nad 800°C. Uhlík reaguje také s vodními parami, které se nejprve přemění při teplotách do 810°C v CO₂ (hluboko uvnitř formy) a při vyšších teplotách se přemění v CO (u povrchu formy).



Uvnitř pískových forem se neustále vytváří a obnovuje atmosféra složená z různých plynů a probíhá neúplné okysličení C na CO₂, jehož přítomnost je ve velkých množstvích na líci formy experimentálně potvrzena. Pokud je do formy neustále dodáván kyslík, dojde k úplnému shoření organických látek s přednostním vznikem CO₂.



TEPELNÝ ROZKLAD ORGANICKÝCH LÁTEK (DESTILACE)

Pomalý tepelný rozklad organických látek nastává při ohřevu bez přístupu vzduchu nebo jiného oxidovadla. Dochází k narušení struktury a destilaci nejprve těkavějších frakcí a po zvýšení teploty frakce méně těkavé. Výsledným produktem destilace je koks. Při reálném odlévání se reakce liší tím, že se organické látky nacházejí v disperzním stavu, což při rychlém ohřevu na lici formy způsobí narušování pořadí uvolňování jednotlivých frakcí. Za těchto podmínek vzniká jediná směs par a plynů, ve které mají její jednotlivé složky rozdílnou teplotu. Chemické složení plynů při termickém rozpadu je charakteristické přítomností velkého množství par H_2O , olejů, nasycených a nenasycených uhlovodíků. Z důvodu nepřítomnosti kyslíku v pórech směsi nedochází ke shoření produktu reakce. Během procesu filtrace kondenzuje část těchto produktů uvnitř formy a zbylá část uniká ven do atmosféry. Tento děj se významně uplatňuje při ohřevu směsí obsahujících velké množství organických částí pojiv (umělé pryskyřice, uhelná moučka)

TEPELNÝ ROZKLAD MINERÁLŮ

Ohřevem některých materiálů ve směsi dochází k uvolňování plynné složky. Některé minerály mají vysokou plynotvornost např. 1 kg CaCO_3 uvolňuje $0,224 \text{ m}^3$ plynu CO_2 . Nedílnou součástí minerálů je i voda, která se v nich váže třemi způsoby.

Konstituční voda: vyznačuje se nejpevnější vazbou s krystalickou mřížkou, uvolňuje se při určité teplotě, obvykle při vypalování nebo při chemické reakci, tento proces není vratný a dochází po něm k rozpadnutí minerálu.

Krystalizační voda: má mnohem slabší vazbu než voda konstituční a je uvolňována při žhání, někdy i ve dvou nebo třech teplotních intervalech. Po namočení se voda opět naváže na materiál (v mnohých případech).

Volně vázaná voda proniká do krystalické mřížky, ale není chemicky vázaná. Její vazba je dána teplotou, tlakem a časovým intervalem, kdy je minerál vystaven jejímu působení.

DISOCIACE PLYNŮ

Může nastat u plynů uvolňujících se v důsledku působení některého z výše popsaných dějů. Nejčastěji se takto rozkládají uhlovodíky za působení vysokých teplot. Dochází při tom ke zvětšování objemu plynné fáze a k usazování uhlíku ve formě sazí v pórech směsi.



Jednotlivé plyny mohou vstupovat do reakce jak mezi sebou, tak s látkami formy a slitiny (probíhají za současného zvětšování objemu, vlivem čehož se zvyšuje rychlost úniku plynů z formy).

ROZPÍNÁNÍ VZDUCHU

Uvnitř formy je mezi částicemi uzavřeny vzduch. Ten tvoří v závislosti na stupni zhuštění a pórovitosti formy 26 až 38% objemu směsi. Při ohřevu formy dochází ke zvětšení objemu tohoto plynu. Ve většině případů se bude zvětšení objemu při ohřevu na 500-700°C podílet pouze malou částí na celkovém objemu uvolňujících se plynů a to jen po velmi krátkou dobu (pouze několik sekund přímo po odlití, většina plynů odchází s výfuky ven z formy) [7], [1].

2.1 URČOVÁNÍ PLYNOTVORNOSTI FOREM A JADER

Plynotvornost formy je určena objemem plynů a par V_{pl} , které se uvolňují z formy o objemu V_F :

$$V_{pl} = M \cdot V_F, \quad (13)$$

kde značí: V_{pl} - objem plynů a par [m^3];

M - měrnou plynotvornost směsi při ohřevu na kritickou teplotu T_m [$\text{m}^3_{pl} \cdot \text{m}^{-3}_F$];

V_F - objem formy.

Objem formy se dá určit také ze vztahu mezi povrchem styku formy s odlítkem a hloubkou prohřátí formy na kritickou teplotu:

$$V_F = S_F \cdot H_F \quad [\text{m}^3] \quad (14)$$

kde značí: S_F – povrch styku odlitku s formou $[\text{m}^2]$;

H_F – hloubku prohřátí formy na teplotu T_M .

Za předpokladu, že hloubka prohřátí formy se mění v závislosti na čase prohřívání získáme vztah závislosti objemu plynů na čase:

$$V_{pl} = S_F \cdot M \cdot m_F \cdot \sqrt{t} = A \cdot \sqrt{t} \quad [\text{m}^3] \quad (15)$$

Kde značí:

A – koeficient plynovornosti formy $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1/2}]$

Definice koeficientu plynovornosti

$$A = S_F \cdot M \cdot m_F \quad (16)$$

Měrný koeficient plynovornosti je pak určen vztahem mezi koeficientem plynovornosti a povrchem styku odlitku s formou.

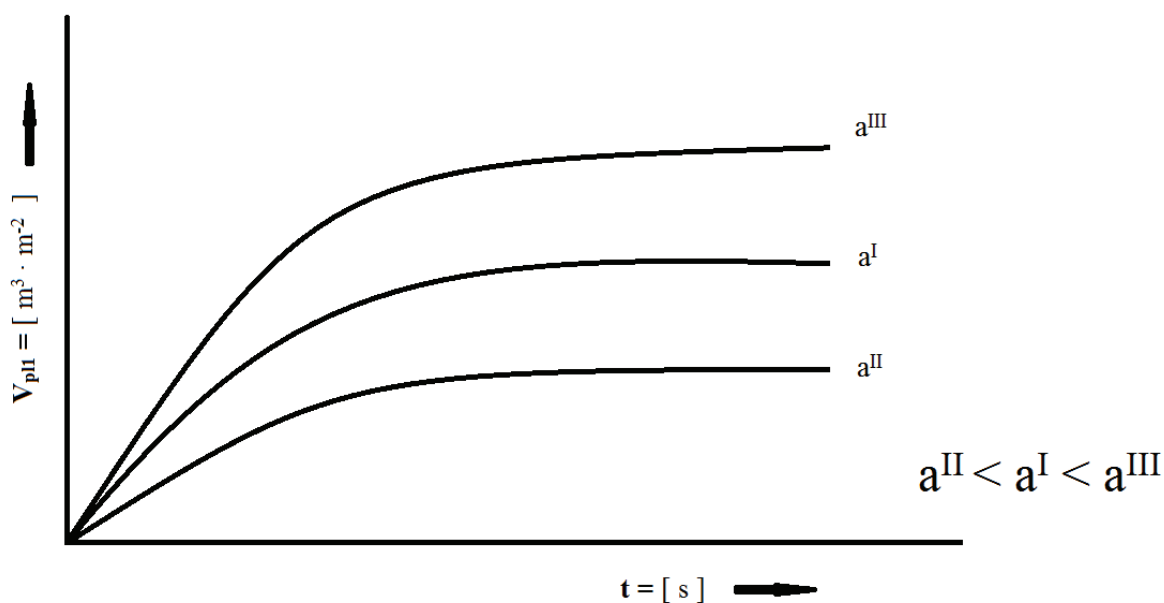
$$a = \frac{V_{pl}}{S_F \cdot \sqrt{t}} = \frac{M \cdot m_F}{\sqrt{t}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}] \quad (17)$$

A - charakterizuje koeficient plynovornosti pro celkový objem plynů, uvolňujících se za čas z celého povrchu styku taveniny s formou nebo jádrem, měrný koeficient a vyjadřuje intenzitu vývinu plynů z jednotky povrchu styku formy s roztaveným kovem. Vztah můžeme vyjádřit:

$$V_{pl} = a \cdot S_F \cdot \sqrt{t} \quad [\text{m}^3] \quad (18)$$

Po dosazení za $S_F = 1 [\text{m}^2]$

$$V_{pl} = a \cdot \sqrt{t} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}] \quad (19)$$



Obr. 13 Grafické znázornění vztahu (19) [1]

Ze vztahu pro vyjádření měrného koeficientu plynovornosti vyplývá, že měrný koeficient plynovornosti závisí na měrné plynovornosti směsi a na koeficientu prohřátí formy [1].

Možnosti snížení plynovornosti formy tedy jsou:

- Zmenšení plynovornosti směsi
- Zmenšením intenzity prohřátí formy

Tab.3 Charakteristiky plynovorných podílů formovacích a jádrových směsí [1]

Plynovorný podíl ve směsi (1% hmotnosti)	Kritická teplota rozkladu T_M [°C]	Měrný tepelný koeficient plynovornosti a
Voda	100	$2,6 \cdot 10^{-2}$
Jílové pojivo	200-400	$(0,01-0,15) \cdot 10^{-2}$
Vápenec	860-910	$(0,2-0,3) \cdot 10^{-2}$
Sulfitové pojivo	220-260	$0,75 \cdot 10^{-2}$
MF- pryskyřice	280-320	$1,0 \cdot 10^{-2}$
FF- pryskyřice	650-750	$0,7 \cdot 10^{-2}$

Dalším důležitým aspektem posuzování plynotvornosti formy je rychlost vývinu plynů. Tato rychlost dosahuje nejvyšších hodnot v okamžiku ihned po odlití, což může vést ke značnému zvýšení tlaku plynů P_{pl} a tím pádem ke zhoršení kvality povrchu odlitku (pronikání plynů do taveniny, vznik plynových kapes). Rychlost vývinu plynů se určuje vztahem:

$$V_{pl} = \frac{dV_{pl}}{dt} = \frac{a}{2\sqrt{t}} \quad [m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \quad (20)$$

Eliminace vývinu plynů a par uvolňujících se z formy při lití, lze dosáhnout vhodným tepelným zpracováním forem a jader před litím (sušení, žíhání). Při těchto operacích dochází k částečnému rozložení plynatvorných látek a vznikající plyny a páry snadněji přecházejí do atmosféry bez nebezpečí zhoršení jakosti povrchu odlitku.

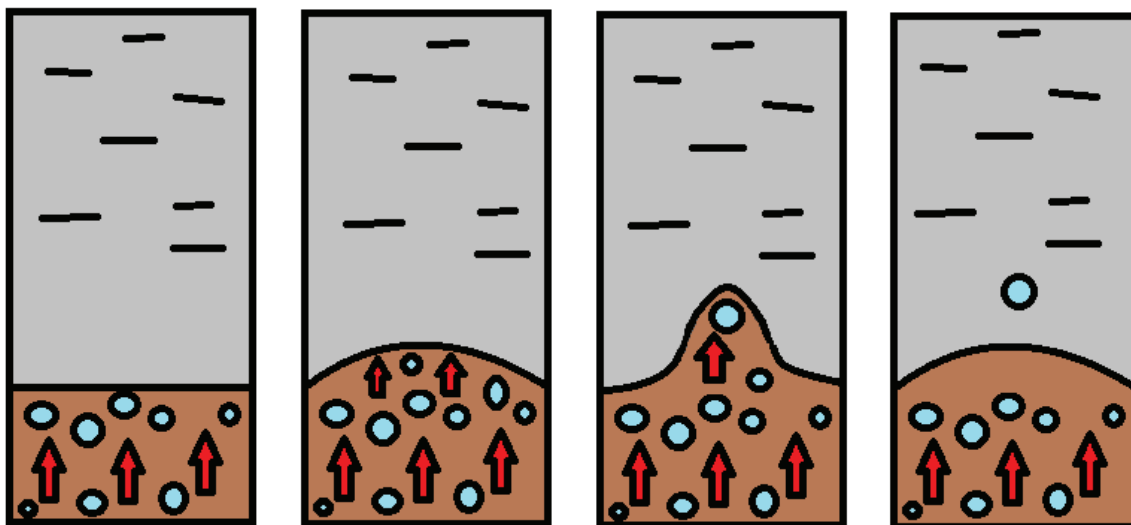
2.2 VZNIK A PRONIKÁNÍ PLYNŮ A PAR DO TAVENINY

Při nevhodně nastavených energetických a tlakových podmínkách může nastat děj pronikání plynů do taveniny a s ním spojená horší jakost odlitku. Plyny z formy mohou do odlitku unikat dle této rovnice:

$$P_F = p_m + p_p + p_{pf} \quad (21)$$

Ve vzorci představuje P_F celkový tlak plynů ve formě. Dá se vyjádřit jako součet metalostatického tlaku p_m , odporu kovu proti vniknutí plynové bubliny do taveniny p_p a přetlaku plynů nad hladinou roztaveného kovu p_{pf} .

Plynové bubliny vznikají v odlitku, když je celkový tlak plynů větší než součet dílčích tlaků. Nejvíce plynů se z formovacích a jádrových směsí vylučuje ihned po odlití, kdy je malá tloušťka ztuhlého kovu a malý metalostatický tlak. Nejprve se vyloučené plyny začnou shromažďovat u povrchu taveniny, se zvyšujícím se tlakem začnou překonávat odpor kovu proti vniknutí a začnou prostupovat do taveniny. S ještě větším nárůstem tlaku se bublina vlivem povrchových napětí zaškrtní a v momentě překonání metalostatického tlaku uvolní do taveniny, viz obr. 14.



Obr. 14 Grafické znázornění úniku plynů do taveniny [5]

2.3 MĚŘENÍ PLYNŮ A PAR VZNIKAJÍCÍCH PŘI ODLÉVÁNÍ

Plynotvornost je možné měřit dvěma odlišnými způsoby. První metoda napodobuje tepelné namáhání na vzorku formovací nebo jádrové směsi v laboratorních podmínkách a druhá přímo sleduje množství a objem vzniklých uvolněných plynů a par na reálném odlitku v reálných podmínkách (vzniklých stykem taveniny s lícem formy). Podle toho se dělí na:

- a) Nepřímé metody (laboratorní)
- b) Přímé metody (provozní)

Vznik plynů a par ve formovací směsi není stejný, u choulostivějších odlitků se proto při jeho měření musí postupovat velice opatrně. Postupem času byly vypracovány různé zkoušky, kterými se plynotvornost měří. Každá měřicí metoda je založena na jiném principu, tudíž nelze jejich výsledky přímo srovnávat. Konfrontovat jednotlivé výsledky lze pouze z výsledků zkoušek prováděných stejnou technologií. Jednotlivé měřicí metody lze rozdělit na:

- 1) Zahřívání malých vzorků písku na lodičce v laboratorní trubkové peci, měření vzniklých plynů a par s vyloučením kondenzátu.
- 2) Měření plynů vzniklých ze zalitých pokusných jader, a to s vyloučením kondenzátu.

- 3) Měření tlaku plynů a par, vzniklých v pokusném jádru zalitém nebo ponořeném do roztaveného kovu.
- 4) Měření proudových rychlostí (a tedy množství plynů a par) v jádru, zalitém nebo ponořeném do roztaveného kovu.
- 5) Stanovení ztráty žíháním.

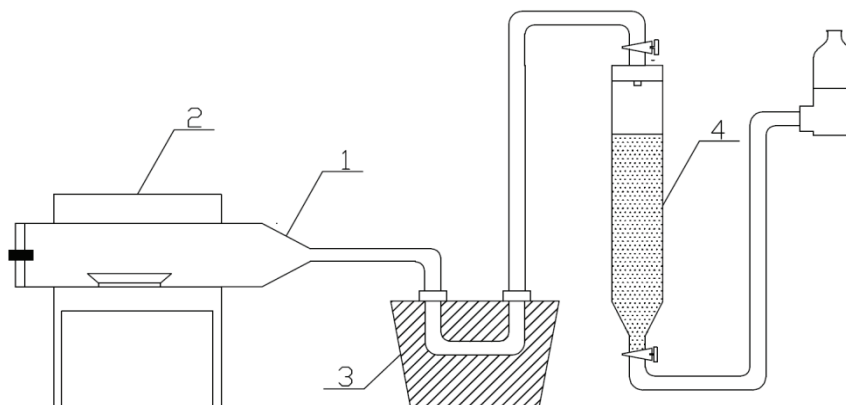
a) Nepřímé metody měření plynotvornosti:

Nepřímé metody sledování plynotvornosti jsou založeny na sledování malého vzorku formovacího materiálu zahřívaného v peci. Většina metod spočívá v ohřívání malého množství vzorku formovací nebo jádrové směsi (nejčastěji 1-5 gramů) v peci vyhřáté na teploty okolo 1000°C. Jedním z nejstarších způsobů měření plynotvornosti nepřímou metodou byla Marsova pec (viz obr. 15). Princip měření spočívá ve vložení malého množství navážky na porcelánové lodičky do pece. Zde se směs zahřívá a vyloučené plyny proudí chladičem do kalibrované trubice pro měření objemu plynů (eudiometru).

Tohoto principu využilo ve 30. a 40. letech řada dalších např. A. Nizovcev nebo W.H.Dietert. Hlavními nedostatky byly nepřesné množství navážky, vylučování kondenzátu při zahřátí, který se choval jako plyn a neurčitá rychlost zahřívání.

Další metodou sledování plynotvornosti je kontrola váhovým rozdílem. Měření spočívá ve vložení vzorku formovací směsi do předem vyhřáté pece a jeho zahřátí na stanovenou dobu. Výsledkem zkoušky je úbytek váhy vzorku v závislosti na čase ohřevu.

Časem se vytvořilo mnoho dalších metod, které odstranili, nebo alespoň eliminovali prvotní faktory vzniku chyb měření. Používají se moderní odporové pece, vlastní atmosféry popř. přivádění netečných plynů za účelem zaručení stálosti vlivů tvorby plynotvornosti a zamezení možnosti hoření vzdušného kyslíku [8].



1) žáruvzdorná trubice se vzorkem směsi; 2) Marsova pec; 3) chladič; 4) eudioměr

Obr. 15 Schéma měřícího zařízení s Marsovou pecí [8]

b) Přímé metody sledování plynotvornosti

Přímé metody sledování plynotvornosti vycházejí z reálných podmínek, které můžeme naměřit při odlévání konkrétního odlitku. Objem vzniklých plynů je sledován tlakoměry a plynoměry různé konstrukce, umístěnými přímo ve formě, a proto nám dává přesnější informace o vývinu plynů než měření nepřímými metodami. Množství vzniklých plynů se většinou měří v závislosti na vzniklém tlaku při odlévání. Objem vzniklých plynů a rychlost jejich tvorby je závislý na čase. Přímé metody sledování plynotvornosti jsou finančně mnohem náročnější než metody nepřímé, protože se musí ke každému měření přistupovat individuálním způsobem a není tedy možné ho aplikovat na měření většího množství druhů odlitků. Existuje několik možností sledování plynotvornosti přímou metodou, které se od sebe liší druhem formy, zaformováním odlitku nebo rozměry vzorku.

Měření dle Jašina - plynotvornost se měří pomocí trubice, která je připojená na měřící zařízení snímající objem a tlak vzniklých plynů. Vzorek je umístěn do kovové formy a postupně se zalévá taveninou (buď pouze z jedné strany, nebo celý najednou). Hodnoty z měřícího zařízení jsou odečítány po předem stanovených časových intervalech.

Ponorná zkouška - pro tuto zkoušku se musí vzorek připravit speciálním způsobem. Do vzorku je zalisována malá trubička. Pro provedení zkoušky je zapotřebí zvláštního mechanického zařízení, které se skládá z ramene, ukazatele přesné polohy a vzduchového

válce. Vzorek se konstantní rychlostí ponořuje do nádoby s roztavenou taveninou až do hloubky 200mm. Při ponorné zkoušce se měří tlak plynu v závislosti na čase. Z měření se získávají dvě hodnoty. První se získá hned na počátku, kdy se k vytvořeným plynům přidávají ještě plyny obsažené v pórech vzorku, které prudkým ohřevem ještě zvětšují svůj objem. Ty jsou částečně odváděny pomocí zalisované trubičky a částečně pronikají taveninou. Pára a kondenzující plyny se hromadí v kondenzační zóně, která se postupně přesouvá do středu vzorku. Druhá hodnota se získává ve chvíli, kdy se kondenzát přesune do středu vzorku k trubičce a vypaří se.

Měření dle Spasského - formovací směs je zaformována do keramického prstence. Plyny se uvolňují do jeho středu a jsou z něho odváděny křemennou trubicí, která je ukončena speciální hermeticky uzavřenou nádobkou o objemu 19300cm^3 opatřenou tlakoměrem. Uvnitř tlakoměru je membrána z tenkého plechu, která se prohýbá. Na ní jsou připojeny tenzometry, které snímají její průhyb. Celkový objem plynů se vypočítá ze znalosti tlaku a objemu nádoby.

Měření dle Berga - vzorek musí mít přesně dané rozměry a to kruhový průřez 150mm, pracovní povrch o ploše 176 cm^2 a tloušťku 50mm. Vzorek se vloží do speciálního prstence a postupně se zalévá taveninou až do výšky 80mm. Během celého procesu se měří objem a teplota uvolňujících se plynů [8], [5].

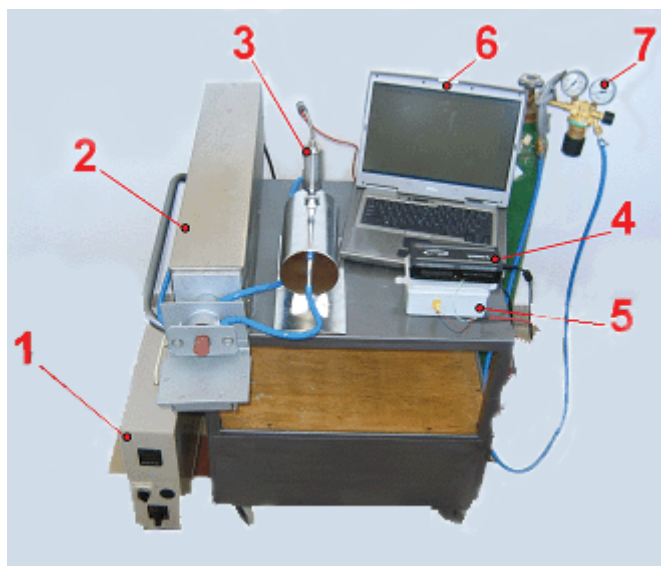
2.4 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PLYNOTVORNOSTI NA KSP TUL

Měření plynotvornosti se na naší katedře provádí na zařízení fungujícím na principu změny tlaku plynů v závislosti na čase (nepřímou metodou). Toto zařízení bylo zkonstruováno a navrženo přímo na katedře strojírenské technologie – FS TU v Liberci a vychází ze zařízení typu PGD a prošlo již dvacetiletým vývojem, během kterého je neustále zdokonalováno k dosažení co nejlepších výsledků měření.

Proces měření spočívá v zahřívání vzorku o hmotnosti 1g položeném na molybdenové lodičce uvnitř zatavené křemenné trubice odporové peci, která je vyhřátá na žádanou teplotu.

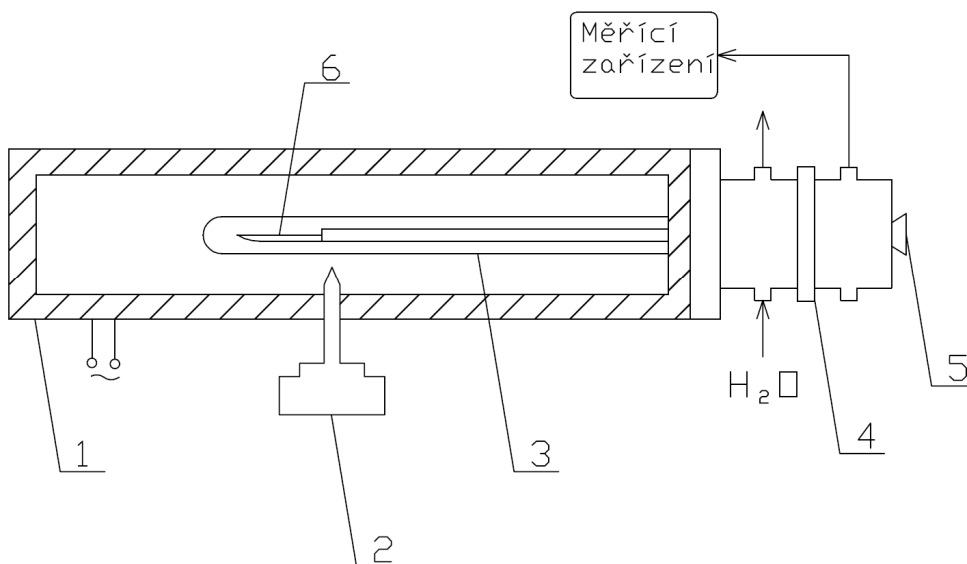
Vzniklý tlak se přenáší trubicí do speciálního válce s tlakovým čidlem, které snímá změny tlaku. Tyto změny tlaku jsou z čidla posílány do sběrnice, která převádí analogový

vstup na digitální a posílá ho přes USB port do PC. Během celého měření je nutné mít zapnuté vodní chlazení. (viz. příloha č. 2)



- 1) regulátor pece (až do 1300°C); 2) odporová pec; 3) válec s tlakovým čidlem;
4) dat. sběrnice; 5) zdroj napětí sběrnice; 6) PC; 7) tlaková nádoba s plynem (N_2)

Obr. 16 Zařízení pro měření plynotvornosti na FS TU v Liberci [10]



- 1) Odporová pec; 2) regulátor pece; 3) křemenná trubice; 4) hlavice s chlazením;
5) uzavírací špunt; 6) molybdenová lodička

Obr. 17 Schéma měřicího zařízení [5]

Kalibrace zařízení - před každým měřením je nutno zařízení kalibrovat, abychom zjistili přesnou hodnotu. Kalibraci je možné provést několika způsoby, na katedře KSP se však používá kalibrace pomocí zátěžové pumpy AMETEK. Tato pumpa je k dispozici na katedře KEZ na TU v Liberci. Změna vstupního tlaku se provádí v rozsahu tlaků 1-10 000 Pa. Výsledkem je kalibrační křivka vyjadřující závislost tlaku na změřeném napětí sestavy pro měření plynovornosti. Hodnoty jsou vyjádřeny pomocí softwaru DaqView na PC. Na základě změřených hodnot pomocí zátěžové pumpy pro rozmezí tlaků 1-10 000Pa byla určena kalibrační konstanta $1\text{Pa} = 0,00030300\text{ V}$, kterou jsem dále používal při výpočtech plynovornosti zkušebních měření provedených jako součást této bakalářské práce [7].

Postup měření

- 1) Zapojení přístroje (zapnutí pece na příslušnou teplotu, zapnutí chlazení, připojení sběrnice a PC)
- 2) Navážení přesného množství vzorku formovací směsí (1g)
- 3) Umístění vzorku na molybdenovou lodičku
- 4) Spuštění měření na PC
- 5) Vsunutí vzorku na molybdenové lodičce a přitlačení dostatečným tlakem na kónický pryžový uzávěr.
- 6) Čekání přibližně 120 vteřin na naměření hodnot
- 7) Vypnutí měření na PC
- 8) Vyjmutí vzorku z pece
- 9) Vypnutí pece

3. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ PLYNOTVORNOSTI

V rámci mého rešeršního sledování plynovotnosti slévarenských formovacích a jádrových směsí jsem pouze orientačně provedl zkušební měření. Měření bylo provedeno na 10 vzorcích CT směsi. Tato směs obsahovala ostřivo, kterým byl slévarenský písek ST 55 PAP (viz. příloha č. 1) s velikostí středního zrna 0,16 mm. Dodavatelem tohoto ostřiva je firma Sklopísek Střeleč. Pojivem směsi byl Novanol, který tvořil 2 hmotnostní % ve směsi. K měření bylo použito uvedené měřicí zařízení, viz obr. 16. Toto zařízení měří na základě aplikace stavové rovnice pro izotermický děj:

$$p \cdot V = konst \quad (22)$$

Rovnice (22) je dále upravena na tvar:

$$\Delta V \cdot p_a = \Delta p \cdot V_0 \quad (23)$$

Kde značí

ΔV – změnu objemu uvolněných plynů ze směsi;

Δp – změnu tlaku uvolněných plynů ze směsi;

V_0 – objem měřicí soustavy ($V_0 = 1995 \text{ cm}^3$);

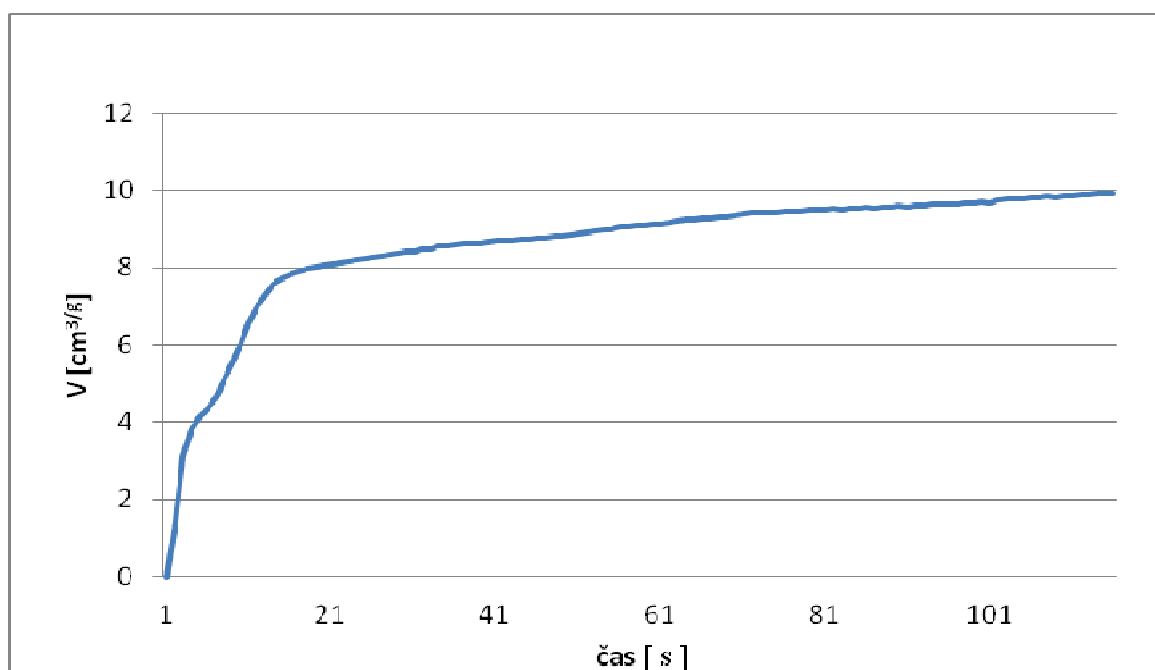
p_a – atmosférický tlak ($97 \cdot 10^3 \text{ Pa}$).

Vzorky pro měření plynovotnosti byly připraveny dle výše uvedeného postupu. Vyrobené vzorky jsou patrné z obr. 18, jejich hmotnost se blížila 1 g.



Obr. 18 Vzorky formovací směsi s přibližnou hmotností 1g

Pro měření plynotvornosti byla hmotnost každého vzorku upravena na hodnotu $1 \pm 0,001$ g. Měření plynotvornosti vzorků $1 \pm 0,001$ g proběhlo při teplotě 1000°C . Protože z dříve prováděných experimentů [5], [10] vyplynulo, že vývin plynů směsí při zahřívání proběhne během 120 s, proto i mé měření plynotvornosti probíhalo po dobu tepelné zátěže 120 s. Měřicí zařízení registruje naměřené hodnoty objemů uvolněných plynů pro příslušné časové okamžiky. Pomocí programu MS Excel byly tyto hodnoty zpracovány do grafické závislosti, viz obr. 19. Tato grafická závislost je průměrem naměřených hodnot z 10 experimentálních měření plynotvornosti. Z obr. 19 je patrné, že k prudkému nárůstu plynotvornosti dochází do časového okamžiku 13 s od počátku tepelného zatížení.



Obr. 19 Vznik plynotvornosti ve zkoušené směsi v závislosti na čase

4. DISKUSE POZNATKŮ A VÝSLEDKŮ

Poznatky obsažené v této rešeršní práci přináší dílčí informace o plynotvornosti formovacích a jádrových směsí. Plynotvornost je nepříjemnou vlastností, která vzniká při tepelném zatížení forem a jader odlévanou taveninou.

Jak je z výše uvedeného patrné, plynotvornost je vyjadřována v cm^3 na 1g směsi, případně na cm^3 směsi. Množství uvolněných plynů v pískové formě je závislé na druhu pojiva a jeho podílu ve směsi. Dále je také důležitá zrnitost ostřiva i obsah různých přísad, jako jsou např. látky určené k vyvolání vytvrzovacích reakcí, či k dosažení technologických požadavků na samotná jádra. Škodlivý vliv těchto plynných produktů závisí na jejich množství, na prudkosti jejich vývinu a na jejich složení.

Vznikající plyny tvoří směs, kde převládají redukční složky (CO , H_2). Jejich únik z místa vzniku do volné atmosféry se projevuje určitým tlakem. Ten je závislý na množství, rychlosti vývinu plynů a odporu kladeným formou. Při vysokých hodnotách tohoto tlaku v blízkosti líce formy může dojít k proniknutí plynů do taveniny v dutině formy a tím ke vzniku plynových bublin v odlitku.

Uvolňování plynů a par ve formách či v jádrech začíná na rozhraní formy a taveniny (na líci formy) a tato oblast vývinu plynů se posouvá hlouběji do formy, dle teploty ohřevu formy a dle teplot rozkladu jednotlivých složek směsi. Z hlediska pojiv je obecně známo, že vyšší plynotvornost vykazují pojiva organického charakteru, než pojiva anorganická. Např. anorganické pojivo bylo použito při měření mé jádrové směsi (Novanol). Výsledná plynatvornost činí cca $10,4 [\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}]$. V porovnání s výsledky měření, které byly prováděny v práci [10] se směsí na bázi pryskyřičného pojiva (jádrová směs PcL1). Tato směs vykazovala při teplotě 1000°C maximální hodnotu plynotvornosti $28,83 [\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}]$. Z tohoto důvodu jsou v současné době trendy používat více anorganická pojiva. Je to např. anorganický pojivový systém, který je uváděn pod názvem INOTEC[®], využívá tříkomponentní složky: silikátové pojivo (1,8 až 2,5 %), urychlovač reakce (0,1 až 1 %) a v případě nutnosti také speciální ostřivo označované INOMIN[®] (tvoří 1 až 30 %) hmotnosti křemenného ostřiva, které je součástí při přípravě směsi s tímto pojivovým systémem, jak uvádí MÜLLER a TEGEL [11].

5. ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo vytvořit ucelený pohled na problematiku vzniku a způsobů měření plynotvornosti. Práce byla vypracována na základě získaných poznatků z odborné literatury a podkladů získaných z měřicího zařízení umístěného na KSP TU v Liberci.

V první části práce je zaměřena na samotné složení a vlastnosti jednotlivých látek, které se používají pro tvorbu netrvalých formovacích směsí. Druhá část pojednává o problematice a vzniku plynotvornosti a způsobech jejího měření, součástí čehož je i popis konstrukce a měření na zařízení pro zkoumání plynotvornosti umístěného na katedře KSP TU v Liberci.

Z obsahu práce vyplývá, že problematiku vzniku plynů a jejich pronikání do taveniny, s tím spojená horší jakost odlitku, je nutné sledovat a pokoušet se jí předcházet. Největší plynotvornost z látek používaných při tvorbě netrvalých formovacích směsí vykazuje voda a jiná kapalná rozpouštědla, mezi pojivy především pojiva anorganická.

Díky moderní technice je možné sledovat chování směsí při tepelném namáhání a vyvodit důsledky, které tuto negativní vlastnost omezí. Pro co nejmenší plynotvornost je nutné zvolit správné množství a druh pojiva, zajistit co nejlepší prodyšnost formy a správný odvod plynů.

Na základě poznatků uvedených v této práci je možno vytvořit tyto dílčí poznatky:

- Plynotvornost slévárenských formovacích a jádrových směsí je nepříjemnou vlastností, která se projevuje při utváření odlitku ve slévárenské formě a může způsobovat jeho vady, nejčastěji plynové dutiny.
- Vyšší plynotvornost vykazují formovací a jádrové směsi založené na bázi organických látek. Proto ke snížení plynotvornosti těchto látek přispívají pojiva anorganického charakteru.
- Sledování plynotvornosti látek není v technické praxi jednoduché, nelze vyrobit zařízení, které by měřilo plynotvornost velkých forem, proto z tohoto důvodu se používají metody nepřímé, při kterých dochází pouze k tepelnému zatěžování sledovaného vzorku formovací nebo jádrové směsi a hodnotí se výše uvolněných plynů při vyšších teplotách (cca 1000, 1200 °C). K tomuto účelu je potřebné speciální měřicí zařízení.



6. SEZNAM LITERATURY:

- [1] KALOUSEK J., KALOUSKOVÁ G., HOLUBEC Z. – Fyzikální chemie metalurgických procesů, [Skripta]. FS,VŠST Liberec 1990.
- [2] NOVÁ, I. - Teorie slévání I. [Skripta]. FS-KSP, TU v Liberci 2006.
- [3] SLOVÁK S., RUSÍN K. - Teorie slévání, SNTL Praha 1990.
- [4] JELÍNEK P. – Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí., ISBN 80-239-2188-6 Ostrava 2004.
- [5] MACHUTA J. – Posouzení plynatosti vybraných slévárenských směsí, [diplomová práce], TU v Liberci 2007
- [6] JENČOVSKÝ M. – Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi [bakalářská práce], Tu v Liberci 2006.
- [7] NOVÁ I., MACHUTA J. – Sledování plynatosti formovacích a jádrových směsí. Slévárenství. LVI, č.-1-2,2008, s 43-47, ISSN 0037-6825
- [8] PETZRŽELA L. - Slévárenské formovací látky, Praha 1955
- [9] NOVÁ I. , NOVÁKOVÁ I., BRADÁČ J. - Techonologie I., [skripta]. Tu v Liberci 2006
- [10] MACHUTA J. - Sledování vlastností formovacích a jádrových směsí během jejich tepelného namáhání, [disertační práce], TU v Liberci 2010
- [11] MÜLLER, J., TEGEL, M. - Inovativní řešení pro slévárny využívající anorganické principy. Slévárenství LVI, 2008, č. 3-4, s. 120 - 122. ISSN 0037-6825.
- [12] Www.kerlubna.cz [online]. 2010 [cit. 2011-05-19]. Keramické hmoty. Dostupné z WWW: <<http://www.kerlubna.cz/imgvyr/ad001.jpg>>.
- [13] Www.vsb.cz [online]. 2006 [cit. 2011-05-19]. Nerudní a stavební suroviny. Dostupné z WWW: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudy/olivín%2002_resize.JPG>.
- [14] Www.vsb.cz [online]. 2006 [cit. 2011-05-19]. Ložiska nerud. Dostupné z WWW: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/nerudy/kaolinit%2001_resize.JPG>.
- [15] ww.vsb.cz [online]. 2006 [cit. 2011-05-19]. Nerudní a stavební suroviny . Dostupné z WWW: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudy/montmorillonit%2001_resize.JPG>.
- [16] Www.glassand.eu [online]. 2010 [cit. 2011-05-22]. Slévárenský písek st 55. Dostupné z WWW: <http://www.glassand.eu/pisky/st_55.html>.
- [17] Www.omegaeng.cz [online]. 1995-2011 [cit. 2011-05-22]. Systémy sběru dat . Dostupné z WWW: <http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc_lg.asp?ref=OMB-DAQ55&Nav=dasc01>.

Přílohy

Příloha č.1

Vlastnosti zkoušeného písku ST 55 PAP

Slévárenský písek ST 55

Zrnitostní data a vlastnosti týkající se velikosti částic

Označení	ST 55	Metody
Velikost středního zrna (d ₅₀)	0,17 mm	sítování
AFS	80	sítování
Vyplavitelné látky	0,50%	
Ztráta žíháním	0,25%	
Sypná hmotnost	1,5 kg/l	
>3150 µm	-	sítování
>2000 µm	-	sítování
>1400 µm	-	sítování
>1000 µm	-	sítování
>630 µm	-	sítování
>500 µm	0,2%	sítování
>400 µm	1%	sítování
>315 µm	3%	sítování
>200 µm	30%	sítování
>100 µm	57%	sítování
>63 µm	7,5%	sítování
<63 µm	1,5%	sítování

Chemické analýzy (RFA)%

SiO ₂	98,9
Fe ₂ O ₃	0,05
K ₂ O + Na ₂ O	0,1
CaO + MgO	0,1

Fyzikální charakteristika

bod tání (°C)	1780
hustota(g/ml)	2,65
tvrdost, Mohs	7
sintrace (spékavost), °C	1560
Vlhkost v mokrému stavu(%)	8,0
Vlhkost v sušeném stavu (%)	0,2
pH	8

Příloha č.2

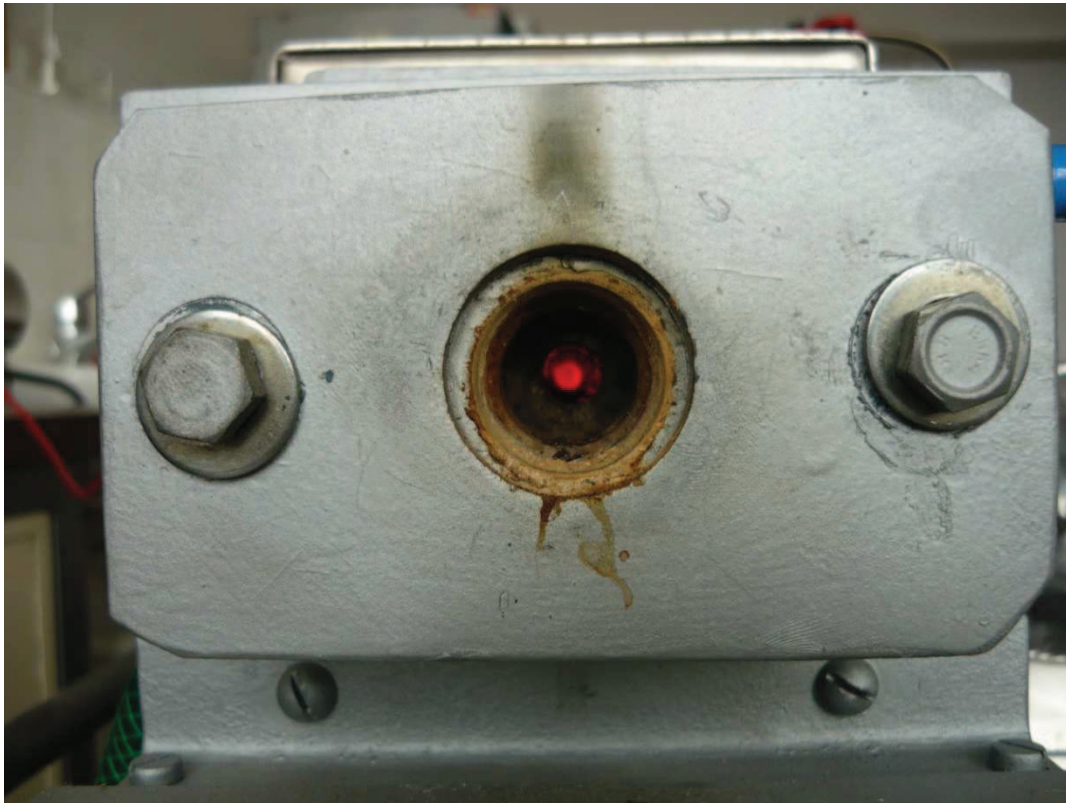
Měřicí zařízení na katedře KSP TU v Liberci



Použitá sběrnice OMB-DAQ-54, OMB-DAQ-55 and OMB-DAQ-56 [17]



Molybdenová lodička pro ohřev vzorku



Rozpálená odporová pec na 1000°C



Použité (vlevo) vs. nepoužité vzorky formovací směsi (vpravo)



Regulátor pece nastavený v době výhřevu nastavený na 1000°C 1